

Fokozott fajlagos teljesítményű axiális átömlésű forgógépek többcélú optimalizálása

c. OTKA K 63704 projekt eredményeinek ismertetése

A jelentésben a projekt eredményeit dokumentáló – megjelent, elfogadott vagy benyújtott – közleményekre hivatkozunk, melyek feltüntetik az OTKA támogatást. A közlemények jegyzéke a dokumentum végén található.

• Bevezetés, célkitűzés

Axiális átömlésű légszállító áramlástechnikai forgógép-járókereknek jellegzetes tervezési módszere a „szabályzott örvény” tervezés (controlled vortex design). E tervezési módszer – szemben a klasszikus „potenciális örvény” tervezéssel (free vortex design), mely sugár mentén állandó lapátcirkulációt vesz alapul – a lapátmagasság domináns részén sugár mentén növekvő lapátcirkulációt és ideális össznyomás-növekedést ír elő. A „szabályzott örvény” tervezés jelentős gyakorlati előnyökkel jár:

- A nagyobb sugarakon lévő lapátmetszetek aerodinamikailag jobban kihasználhatóak, nagyobb mértékben hozzájárulnak a légtechnikai teljesítményhez. Ezáltal fokozott fajlagos teljesítményű járókerek hozhatóak létre, azaz viszonylag nagy térfogatáram és/vagy össznyomásnövekedés valósítható meg mérsékelt gépmérettel, lapátszámmal és fordulatszámmal is.
- A lapáttő terhelésének csökkentésével az agynál fellépő össznyomás-veszteség mérsékelhető.
- A statikus hatásfok javítható az agy átmérőjének és így a kilépési veszteségnek a csökkentésével.
- Egyszerű, könnyen gyártható lapátozás hozható létre, pl. a sugár mentén (közel) állandó lapátszög (mérsékelt elcsavarodás) és/vagy lapáthúrhossz révén. A lapátok átfedése elkerülhető, miáltal költségkímélő módon, egyszerű öntő- vagy fröccsöntőszerszámmal megvalósítható, egybeönthető járókerék (kerékagy + lapátok együtt) hozható létre.
- Többfokozatú gépben a járókerékből kilépő közeg áramlási szöge beállítható úgy, hogy a következő lapátrácsra a közeg belépése áramlástanilag kedvező szögben történjen.
- A lapátmagasság túlnyomó része mentén növekvő, de a lapátcsúcs közelében mérsékelt lapátcirkulációt előírva, a kerületen a kilépő közeg perdülete mérsékelhető. Ezáltal a sugárventilátorok által keltett levegősugár stabilitása, koherenciája javítható.
- A kilépő axiális sebességeloszlás testreszabható az adott alkalmazásban. Például villanymotor-hűtőventilátorok esetén, mivel a hűtőbordák a motor kerületén helyezkednek el, fokozott légáramlást célszerű megvalósítani a nagyobb sugarakon, míg a kisebb sugarakon a légáramlás szerepe másodlagos.

Fenti előnyök mellett hangsúlyozandó, hogy a „szabályzott örvény” tervezési koncepció szerinti, sugár mentén változó lapátcirkuláció miatt a lapátok kilépő éléről örvények úsznak le, miáltal a lapátcsatornában az áramlás jellegzetesen háromdimenziós (3D), bonyolult struktúrával jellemezhető. Ez a 3D jelleg – szemben a „potenciális örvény” tervezéssel, melyben a belső áramlás a gyűrűfalaktól távolabb közelítőleg kétdimenziós – kihívást jelent a lapátozás megbízható tervezése szempontjából.

A korszerű ventilátoroknak egyidejűleg több tervezési célkitűzésnek kell megfelelniük:

- Légtechnikai cél: az elvárt légtechnikai teljesítmény (szállítás, nyomásnövekedés) biztosítása,
- Energetikai cél: fentiek lehető legjobb hatásfokkal történő megvalósítása,
- Akusztikai cél: fentiek mérsékelt zajkibocsátással történő megvalósítása.

Az OTKA projekt célja: olyan módszertan kidolgozása, mely megalapozza az axiális átömlésű forgógép-lapátozások légtechnikai és energetikai célkitűzéseknek megfelelő egyidejű optimalizálását, fejlesztését, tekintetbe véve a zajcsökkentés átfogó lehetőségeit is. A projekt különös hangsúlyt fektet a légtechnikai és energetikai együttes fejlesztésre, a járókerékben kialakuló áramlástani jelenségek légtechnikai és energetikai szemszögű együttes értékelésére.

A lapátgeometria áramlástechnikai-energetikai fejlesztésének, a hatások javításának fontos eleme – és így a projektben fontos szerepet kap – a lapátelfűzési vonal alakjának helyes megválasztása. A lapát felfűzési vonala a lapátmetszetek súlypontját összekötő vonal. A klasszikus lapátozás „egyenest”, azaz radiális felfűzési vonalú. Ezzel szemben a korszerű forgógépeknél gyakran alkalmaznak lapátnyílazást – a lapátmetszetek eltolása a lapáthúrral párhuzamosan –, illetve lapátferdítést – a lapátmetszetek eltolása kerületi irányban (magában foglalva a lapátnyílazást). Előrenyílazás: adott sugáron a lapátmetszet áramlás irányában előrébb helyezkedik el, mint a szomszédos kisebb sugáron elhelyezkedő lapátmetszet.

Az áramlási zaj is szerepet kap a projektben mint az áramlástani folyamatot kísérő, mérséklendő hatású jelenség. Azonban a zaj figyelembe vétele fenomenológiai. A jelen projektben nem tűzzük ki tehát célul az áramlási és zajkeltési mechanizmusok összefüggéseinek részletekbe menő, kvantitatív, mérési és numerikus eszközöket is felhasználó vizsgálatát, feltárását. Erre a jelen projekt folytatásaként az OTKA 83807 projektben vállalkozunk („Fokozott terhelésű axiális átömlésű járókerék-lapátrácsok aerodinamikai és zajkeltési mechanizmusainak együttes vizsgálata”), melynek pályázatát benyújtottuk.

A projekt újdonságtartalmának fő elemei:

- Kifejezetten „szabályzott örvény” tervezésű, fokozott fajlagos terhelésű lapátok kifejlesztésére irányul, különös részletességgel figyelembe véve a 3D lapátcsatorna-áramlás eddig fel nem tárt jellegzetességeit.
- Hiánypótló módon vizsgálja a „szabályzott örvény” tervezés valamint a lapátnyílazás/lapátferdítés együttes alkalmazásakor fellépő aerodinamikai és energetikai hatásokat.

• Elvégzett feladatok

A projekt indításakor egyszerűsített áramlástani alapesetek numerikus áramlástani (Computational Fluid Dynamics, **CFD**) vizsgálatát tűztük ki célul, ezzel megalapozva a későbbi forgógép-vizsgálatok CFD módszertanát. A forgógép-lapát modelljeként szárnyprofil választottunk, és a szárnyprofil körüli áramlást vizsgáltuk. Első lépésként a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes (RANS) egyenleten alapuló szimulációt végeztünk [1]. CFD vizsgálatainkat ANSYS-FLUENT rendszerben végeztük.

A későbbiekben a szimulációs módszerbe bevontuk a nagy örvény szimulációt (Large Eddy Simulation, **LES**) is, ezzel igazodva ahhoz a korszerű nemzetközi trendhez, mely a részletekbe menő CFD és numerikus aero-akusztikai (Computational Aero-Acoustics, **CAA**) vizsgálatokhoz LES számításokat vesz alapul. A LES módszer meghonosításával előkészültünk a jövőbeni, részletes forgógép CFD és CAA tanulmányokhoz. A Hybrid/zonal RANS/LES számításokkal a korábban már említett szárnyprofil körüli áramlást tanulmányoztuk [2-4], külön vizsgálati szempontként tekintve a fokozott terhelésű forgógépekben gyakori határréteg-leválást [5]. A LES technikát sikerült olyan szintre fejlesztenünk, hogy a szárnyprofilon túlmutatóan lehetővé vált kisméretű, realisztikus forgógép modellezése is [6].

Egyszerűsített esetekre CAA előtanulmányokat végeztünk, ezzel előkészítve a numerikus akusztikai eszköztár kialakítását. Vizsgálati esetül örvények összeolvadása (vortex merging) által generált zajt választottunk [7]. Választásunk összhangban állt azzal a ténnyel, hogy az ún. örvényszaj az axiális átömlésű ventilátor-járókerek egyik jelentős zajforrása.

Megismertük a többcélú optimalizáció elméleti alapjait, matematikai hátterét. Beszereztük a ModeFRONTIER többcélú optimalizációs szoftvert, megismertük használatának alapjait. Az optimalizációs és a CFD szoftver kommunikációját egyszerűsített esettanulmányra kidolgoztuk: lapátrácsra belépő közeg áramlási irányát optimalizáltuk, úgy, hogy a legkedvezőbb megfűvási szög hatására a lapátmetszeteken maximális siklószám álljon elő [8-9].

Mivel célkitűzésünk szerint nagy számú lapátgeometria-változat algoritmizált CFD szimulációja volt, szükségessé vált egy matematikai eljárás kifejlesztése a lapátgeometria-változatok és a hozzájuk kapcsolódó numerikus háló generálásához. A geometriai módosítások fontos elemének tekintettük a lapát felfűzési vonal alakjának változtatását, lapátnyilazás illetve lapátferdítés bevezetésével. E matematikai eljárás felhasználásával tanulmányokat végeztünk egyszerűsített esetekre, lapátrácsokra vonatkozóan, a lapátok elcsavarodásának és nyilazásának aerodinamikai hatására vonatkozóan [10-11].

A program során komoly nehézségekkel kellett szembesülnünk, melyek az eredeti tervekhez képest a projekt módosítását tették szükségessé. A személyi feltételek változása, az előre nem látott numerikus modellezési nehézségek kikényszerítették a munkaterv újragondolását. A numerikus áramlástani vizsgálatok előkészületei, pl. a numerikus háló kialakítása – elsősorban a járókerék-esettanulmányoknál –, valamint a számítógépes futtatások időigénye – elsősorban a LES esetén – nagyságrendileg meghaladták az eredetileg tervezett időkeretet, az előre nem látott módon korlátozott számítástechnikai háttér miatt is. Emiatt nem vált lehetővé átfogó, algoritmizált optimalizációs program kidolgozása. Ehelyett a projekt végeredményeként összehangolt, összehasonlító áramlástechnikai és akusztikai esettanulmányokat mutattunk be, melyek körét néhány járókerékre kellett csökkentenünk. Továbbá a tervezetthez képest csak mérsékelt számú lapát-prototípus (geometriai változatok) gyártatását és vizsgálatát tudtuk elvégezni.

Az előtanulmányok tapasztalatai alapján, a módszertan továbbfejlesztéseként forgógép-járókerekre végeztünk összehangolt CFD és/vagy CAA esettanulmányokat és továbbfejlesztettük a tervezési módszert. Itt hangsúlyt fektettünk a „szabályzott örvény” tervezés és a radiálistól eltérő felfűzési vonal-alak együttes hatásaira.

Elvégeztük egyenes valamint előreferdített lapátozás összehasonlító aerodinamikai-energetikai [12-13], majd numerikus akusztikai [14] vizsgálatát. Az esettanulmányul szolgáló, általunk tervezett, ferdített lapátozású járókerék a Mezőgazdasági Gépesítési Intézetben üzemel Gödöllőn.

A CFD módszerek kísérleti validációja érdekében a forgógépekre alkalmazandó áramlástani mérés technikát tovább kellett fejlesztenünk. Többkomponensű hődrótos mérőrendszert dolgoztunk ki [15], és a forgógépekre alkalmazott egyéb mérés technikai módszereket – pl. jelleg- és hatásfok-görbe mérés – is áttekintettük [16]. E technikák megvalósítása után részletes méréseket végeztünk [17-18], melyek eredményeit a későbbiekben a CFD technika validációjában felhasználtuk. A mérés technikai vizsgálatokat kiterjesztettük akusztikai mérésekre is: a későbbi forgógép-zajmérés technikáját első közelítésben szárnyprofil által keltett zaj vizsgálatában teszteltük [19].

A forgógép-lapátozások javítását megalapozandó, áramlástechnikai és energetikai modelleket dolgoztunk ki a tervezési módszer továbbfejlesztése érdekében, figyelembe véve a „szabályzott örvény” tervezés, a 3D lapátcsatorna-áramlás, és a radiálistól eltérő felfűzési vonal sajátosságait. Megvizsgáltuk a lapátnyilazás aerodinamikai és energetikai hatásait [20], majd a vizsgálatok körét kiterjesztettük a lapátferdítés hatásaira is [21]. Szisztematikusan elemeztük a „szabályzott örvény” módszer és a lapátok előrenyilazásának együttes hatását a lapátcsúcs közelében [22] valamint a gyűrűfalaktól távolabb [23]. A „szabályzott örvény” lapáttervezési módszer gyakorlati hatékonyságát, alkalmazhatóságát ipari tervezési esettanulmányokon teszteltük [24-25].

A tapasztalatok bővülésével továbbfejlesztettük a forgógépekre alkalmazott CFD módszertanát, mind a numerikus háló [26], mind az alkalmazott turbulencia-modellezés [27] tekintetében.

Tanulmányoztuk a „szabályzott örvény” tervezésű járókerek viselkedését fojtott – tehát a tervezésinél kisebb térfogatáramú – üzemállapotokban, és feltártuk, hogy az előrenyilazás

különösen kedvező a légtechnikai és energetikai jellemzők javítása érdekében a „szabályzott örvény” tervezés esetén [28].

Mivel a radiálistól eltérő lapátfelfűzés esetén a lapátok forgatásából származó centrifugális erő hajlítónyomatékkal terheli a lapátot, a káros deformációk elkerülése érdekében szempont a lapáttömeg csökkentése. Ez bizonyos alkalmazásoknál polimer kompozit lapátok alkalmazásával valósítható meg. A lapátok kivitelezésére megfelelő szilárdságú, emellett költségkímélő polimer kompozit technológiát javasoltunk [29].

Polimer technológiával készítettünk el az OTKA projekt végén többféle előreferdített lapátozású járókereket is. E járókerekek villanymotorok hűtését szolgálják. Előtervezésük a „szabályzott örvény” módszeren alapult, többféle lapátcirkuláció-eloszlás feltételezésével. Az iteratív tervezési folyamatban hiánypótló szerepet kapott az általunk megalapozott CFD módszertan. A fő zajforrásokat – pl. légrés-áramlás – a korábban ismertetett CAA módszerekkel tártuk fel. A kísérleti vizsgálatok érdekében mérőberendezést építettünk ki. A numerikus modellek alkalmasságát, valamint a légtechnikai és akusztikai javulás tényét mérésekkel igazoltuk. Az előreferdített lapátozások révén jelentős teljesítményfelvétel-csökkenést és zajcsökkentést értünk el, az előírt hűtési cél elérése mellett. E vizsgálatok révén meghonosítottunk egy olyan forgógép-fejlesztési módszertant, amelyben a CFD, CAA, áramlástan mérés-technika és akusztikai mérések egyedülálló szimbiózisa valósult meg Magyarországon. Az eredmények közzlése folyamatban van [30].

• A projekt eredményei

A legfontosabb vonatkozó közleményekre hivatkozva:

1) A „szabályzott örvény” tervezés és a lapátnyilazás/lapátferdítés együttes alkalmazására vonatkozó, a publikációkban számszerűsített új megállapítások, tervezési támpontok, amelyek hozzájárulnak az összehangolt légtechnikai és energetikai tervezéshez, és amelyek közül a legfontosabbak:

- A „szabályzott örvény” tervezésben a sugár menti lapátcirkuláció-gradienssel közel arányosan fokozódik a szívott oldali lapát-határréteg radiális kiáramlása, és ezáltal – a határréteg-közeg lapátcsúcsnál történő felgyülemzése révén – a csatornafalon kialakuló határréteg kiszorító hatása. E kedvezőtlen hatás a lapátozás előrenyilazásával mérsékelhető. Az előrenyilazás révén ugyanis a radiális kiáramlás mérsékelhető. [22]

- A „szabályzott örvény” tervezés hatására a lapát szívott oldali határrétegében a radiális irányú kiáramlás fokozódik, fokozva a gyűrűfalaktól távolabb a lapát menti folyadékpályák hosszát és így a falsúrlódás hatásfelületét, ezáltal esélyt adva az össznyomás-veszteség fokozódására. E kedvezőtlen hatás szintén a lapátozás előrenyilazásával mérsékelhető. [21] Az előző pont figyelembe vételével: a lapátozás előrenyilazása különösen javasolt a „szabályzott örvény” tervezési módszer esetén – szemben a „potenciális örvény” tervezéssel –, mind a lapátcsúcs-környéki, mind a kisebb sugarakon jellemző veszteség csökkentése érdekében.

- Az előrenyilazott/előreferdített lapát csúcsa előrenyúlik a belépő folyadéktérbe, és helyileg megnöveli az axiális sebességet. Ennek hatására adott térfogatáramon módosul a teljes lapátmagasság mentén a rááramlás axiális sebességprofilja és így a megfűvás szöge. Ezt a hatást figyelembe kell venni a lapátozás aerodinamikailag és energetikailag helyes tervezésekor. [13]

2) CFD módszertan meghonosítása és kidolgozása – távlatilag integrálva a LES technikát is –, mely a fenti tervezési támpontokat az előtervezési fázis után érvényre juttatja, megalapozva az axiális forgógépek CFD alapú „szabályzott örvény” iteratív tervezését, a légtechnikai és energetikai célok együttes elérése érdekében. [3, 6, 13, 20]

3) Numerikus akusztikai módszertan meghonosítása és kidolgozása – távlatilag integrálva a LES technikát is –, valamint csatolása a CFD módszertanhoz, forgógépek zajcsökkentése érdekében, az előírt légtechnikai és energetikai célok elérése mellett. [3, 6-7, 13-14].

A munkatervben vállalt publikációs kötelezettséget – 8 nemzetközi fórumon és 4 hazai fórumon közölt publikáció – jelentősen túlteljesítettük: 14 nemzetközi és 15 hazai publikációt készítettünk. Eredményeink közlése során kiemelt fontosságúnak tekintettük az SCI által jegyzett, impakt faktoros folyóiratokban történő publikációt [13, 19-22].

Az OTKA projekt jelentősen hozzájárult Dr. Ali R. A. Kwedikha sikeresen megvédett PhD értekezéséhez [31]. Háttérét képezi továbbá Nagy László és Horváth Csaba PhD programjának, valamint Dr. Vad János [32] készülő akadémiai doktori értekezésének.

• Közlemények jegyzéke

- [1] Nagy, L., Vad, J., Lohász, M. (2006), RANS simulation of RAF6 airfoil. *Proc. GÉPÉSZET'2006 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, Budapest, Hungary (CD-ROM) (ISBN 963 593 465 3)
- [2] Nagy, L., Lohász, M. M., Rékert, T., Vad, J. (2008), Hybrid/zonal RANS/LES computation of an airfoil. *Proc. GÉPÉSZET'2008 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, Budapest, Hungary (CD-ROM) (ISBN 978-963-420-947-8)
- [3] Nagy, L., Rékert, T., Lohász, M. M. (2010), Large-Eddy Simulation in the vicinity of the RAF-6E airfoil in reduced domain. 19th Polish National Fluid Dynamics Conference, September 2010, Poznań, Poland (elfogadva)
- [4] Nagy, L., (2010), Szárny körül kialakuló áramlás numerikus szimulációja. *OGÉT 2010-XVIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó*, Baia Mare, Románia, 2010 április, pp. 310-313.
- [5] Horváth, I., Nagy, L. (2010), Investigation of Boundary Layer Separation of an Airfoil in a Zonal Domain. *MicroCAD (International Scientific Conference)*, Miskolc, Hungary, 2010 március, pp. 39-44.
- [6] Lohász, M. M., Nagy, L., Wurm, H. (2009), LES of the transitional flow in a miniature centrifugal pump. *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'09)*, Budapest, Hungary, 2009, Proceedings pp. 826-832.
- [7] Tóth, P., Lohász, M. M. (2009), Evaluation of the relationship between 2D vortex merging and its acoustic emission by tracking the vortices using Q criteria. *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'09)*, Budapest, Hungary, 2009, Proceedings pp. 642-649.
- [8] Rábai, G., Vad, J., Lohász, M. (2006), Systematic optimization of the inlet flow condition for an axial flow blade cascade. *Proc. GÉPÉSZET'2006 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, Budapest, Hungary (CD-ROM) (ISBN 963 593 465 3)
- [9] Rábai, G., Vad, J., Lohász, M. (2006), Axiális átömlésű lapátrácsok belépő áramképének optimalizációja. *GÉP, LVII. Évf. (11)*, pp. 29-32.
- [10] Rábai, G., Vad, J., Lohász, M. M. (2007), Aerodynamic study on linear cascades of straight, arc-swept and twisted blades. *Proc. 7th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'07)*, Athens, Greece, pp. 589-598.
- [11] Rábai, G., Vad, J. (2009), Aerodynamic study on linear cascades of straight, arc-swept and twisted blades. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering Series*, **53** (1), pp. 33-40.
- [12] Vad, J., Kwedikha, A. R. A., Horváth, Cs. (2006), Combined effects of controlled vortex design and forward blade skew on the three-dimensional flow in axial flow rotors. *Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06)*, Budapest, Hungary, pp. 1139-1146.
- [13] Vad, J., Kwedikha, A. R. A., Horváth, Cs., Balczó, M., Lohász, M. M., Rékert, T. (2007), Aerodynamic effects of forward blade skew in axial flow rotors of controlled vortex design. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, **221**, pp. 1011-1023.

- [14] Horváth, Cs., Vad, J. (2009), Broadband noise source model acoustical investigation on unskewed and skewed axial flow fan rotor cascades. *Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'09)*, Budapest, Hungary, pp. 682-689.
- [15] Horváth, Cs., Vad, J. (2006), Development and application of a multi-component hot wire measuring system. *Proc. GÉPÉSZET'2006 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, Budapest, Hungary (CD-ROM) (ISBN 963 593 465 3)
- [16] Vad, J. (2008), *Advanced flow measurements*. Egyetemi jegyzet, Műegyetemi Kiadó. Jelzet: 45085. ISBN 978 963 420 951 5. (276495 leütés szóközökkel / 40 000 = 6.91 szerzői ív)
- [17] Vad, J., Kwedikha, A. R. A. (2006), Experimental investigation on an axial flow wind tunnel fan by means of on-site measurements. *Proc. GÉPÉSZET'2006 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, Budapest, Hungary (CD-ROM) (ISBN 963 593 465 3)
- [18] Horváth, Cs., Vad, J. (2008), High resolution velocity measurements upstream and downstream of an axial flow fan rotor. *Proc. GÉPÉSZET'2008 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, Budapest, Hungary (CD-ROM) (ISBN 978-963-420-947-8)
- [19] Vad, J., Koscsó, G., Gutermuth, M., Kasza, Zs., Tábi, T., Csörgő, T. (2006), Study of the aero-acoustic and aerodynamic effects of soft coating upon airfoil. *JSME International Journal, Series C – Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, **49** (3), pp. 648-656.
- [20] Vad, J., Kwedikha, A. R. A., Jaberg, H. (2006), Effects of blade sweep on the performance characteristics of axial flow turbomachinery rotors. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, **220**, pp. 737-751. IF (2006): 0.392. IF (2008): 0.609.
- [21] Vad, J. (2008), Aerodynamic effects of blade sweep and skew in low-speed axial flow rotors at the design flow rate: an overview. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, **222**, pp. 69-85. IF (2006): 0.392. IF (2008): 0.609.
- [22] Vad, J. (2010), Radial fluid migration and endwall blockage in axial flow rotors. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, **224**, JPE832, pp. 399-417.
- [23] Vad, J. (2010), Relation of flow path length to total pressure loss in diffuser flows. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy* (benyújtva)
- [24] Molnár, L., Vad J. (2009), Design of a small-scale axial flow fan rotor of high specific performance. *Proc. MICROCAD'2009 Konferencia (International Computer Science Conference)*, Miskolc, Hungary, Section E: Fluid and Heat Engineering, pp. 71-76.
- [25] Vad, J. (2010), Application of controlled vortex design concept to axial flow industrial fans. *Proc. GÉPÉSZET'2010 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, Budapest, Hungary (CD-ROM) (ISBN 978-963-313-007-0), pp. 875-881.
- [26] Horváth, Cs., Vasiliou, O., (2010), Különböző numerikus háló topológiai átmenetek összehasonlítása CFD vizsgálattal. *OGÉT 2010-XVIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó*, Baia Mare, Románia, 2010 április, pp. 182-185.
- [27] Benedek, T., Horváth, Cs. (2010), Különböző turbulenciamodellek összehasonlítása axiális átömlésű ventilátor CFD vizsgálatában. *OGÉT 2010-XVIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó*, Baia Mare, Románia, 2010 április, pp. 64-67.
- [28] Vad, J., Horváth, Cs. (2008), The impact of the vortex design method on the stall behavior of axial flow fan and compressor rotors. *Proc. 2008 ASME TURBO EXPO*, Berlin, Germany, ASME Paper GT2008-50333 (CD-ROM) (ISBN 0-7918-3824-2)
- [29] Vad, J., Morlin, B. (2007), Fluid mechanical model for formation of mineral wool fibers applied in polymer composites. *Materials Science Forum*, **537–538**, pp. 269-276.

- [30] Vad, J., Lohász, M., Horváth, Cs., Jesch, D., Molnár, L., Koscsó, G., Nagy, L. (2010), Redesign of motor cooling fans for noise reduction and efficiency gain. *Proc. 11th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'11)*, Istambul, Turkey (absztrakt elfogadva)
- [31] Kwedikha, A. R. A. (2010), Aerodynamic effects of blade sweep and skew applied to rotors of axial flow turbomachinery. *PhD értekezés*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék.
- [32] Vad, J. (2010), Low-speed axial flow rotors of controlled vortex design with swept and skewed blades. *MTA doktori értekezés*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék. (előkészületben)